

論文 試験体寸法を変化させた RC 造柱の軸力負担能力の評価実験

宮島 雄代^{*1}・阿部 博之^{*1}・加藤 大介^{*2}

要旨：本報告では、せん断破壊する RC 造柱の滑り開始時摩擦軸力を用いた軸力比と軸力負担能力喪失部材角との関係を、寸法を変化させた試験体を用いて実験的に比較、検討した結果を報告する。試験体は断面寸法及び試験体長さを変えた 4 シリーズを作成し、それぞれのシリーズで中心軸圧縮実験を各 1 体、繰り返し載荷実験の作用軸力を変えて各 1 体もしくは 2 体ずつ、計 6 体の試験体の実験を行った。

キーワード：RC 造柱，軸力負担能力，せん断破壊，寸法効果

1. はじめに

筆者らは、RC 造せん断破壊柱を対象に軸力負担能力喪失時の水平部材角の評価法を配筋詳細の影響に着目して検討してきた。その結果、中心軸圧縮加力実験の結果と軸力負担能力喪失部材角に関係があることを報告した^{1,2)}。

本報告では、文献2)の試験体に対して寸法を変化させ、それによって中心軸圧縮加力実験の結果と軸力負担能力喪失部材角の関係の影響を報告する。具体的には、i) 昨年度の試験体に関して全てのパラメータを 1.5 倍にした V シリーズ、ii) 長さのみ 1.5 倍にした L シリーズの 2 つのシリーズを作成し、実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1 に各シリーズの試験体諸元を示す。V, L シリーズは本年度行った実験の試験体であり、* の付いている H シリーズは文献 2) で報告した試験体から寸法効果の観点から比較する試験体を示している。V, L シリーズの形状及び配筋を図-1 に示す。V シリーズは文献 2) の長さに係わる断面と配筋の寸法を全て 1.5 倍に変更した相似形の試験体である。また、L シリーズは、文献 2) の試験体の試験体長さのみを 1.5 倍にしたもので断面と配筋は文献 2) と同じ試験体である。

V78LL シリーズ 2 体と V135LL シリーズ 3 体、L52LL シリーズ 2 体、L90LL シリーズ 3 体の計 10 体を作製し

た。シリーズ名の最初の文字は断面の寸法を表しており、数字は帯筋間隔を表しており単位は mm である。LL は低強度のコンクリートを表している。

試験体形状は、V シリーズが 270×270×1600mm、L シリーズが 180×180×1600mm の直方体である。上下端部は載荷用の基礎部分となっているため試験範囲は中央の 540mm となる。また主筋は、V シリーズは D16 を 4 本用い、L シリーズは D10 を 4 本用いた。試験体の横補強筋は V シリーズに D6、L シリーズに D4 を用いている。帯筋間隔は L シリーズが 52mm と 90mm の 2 種類、V シリーズはその 1.5 倍の間隔としている。

各シリーズ 1 体ずつ中心軸方向載荷試験体を行っており、試験体名の最後の番号が 0 となっている。他の 6 体の試験体は、一定軸力下で繰り返し水平載荷を行った。表-2 に曲げせん断加力試験体の強度の計算値を示す。表中の曲げ強度は、軸力比が 0.4 で変わる終局曲げ強度の略算式により算定した。また、いずれの試験体も既往の研究の方針通りせん断破壊となるように計画したが、L シリーズにおいては結果として、せん断強度の値が曲げ強度の値を上回る結果となった。

2.2 加力装置と載荷履歴

試験体は上下部分を三角形の基礎治具で挟み込んで固定し、上下の鉄骨加力装置にとりつけた。載荷は、図-2 の試験体上部の L 型フレームの上に設置されている軸力ジャッキにより軸方向載荷を行い、水平ジャッキに

表 - 1 試験体諸元

試験体名	柱寸法		主筋			帯筋					コンクリート強度 [N/mm ²]	
	断面 [mm×mm]	高さ[mm]	鉄筋	降伏強度 [N/mm ²]	最大強度 [N/mm ²]	鉄筋	降伏強度 [N/mm ²]	最大強度 [N/mm ²]	形状	間隔[mm]		帯筋比
V-78LL	270×270	540	4-D16	375	534	2-D6	345	499	135deg (6d)	78	0.0027	14.1
V-135LL										135	0.0016	
L-52LL										52	0.0027	
L-90LL	180×180	360	4-D10	364	521	2-D4	432	590	135deg (6d)	90	0.0016	16.8
H52LL*										52	0.0027	
H90LL*										90	0.0016	

*：文献 2) による試験体

*1 新潟大学院 自然科学研究科 大学院生 (正会員)

*2 新潟大学 工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

表 - 2 曲げせん断試験体諸元

試験体名	試験体諸元		計算値など		
	対応する軸加力試験体名	作用一定軸力 [kN]	曲げ強度 [kN]	せん断強度 [kN]	
				靱性保証型 ³⁾	技術基準解説書 ⁴⁾
V78LL-1	V78LL-0	675	170	124	169
V135LL-1	V135LL-0	675	170	97.2	157
V135LL-2		337.5	231	97.2	151
L52LL-1	L52LL-0	300	42.8	53.1	61.9
L90LL-1	L90LL-0	300	42.8	40.3	56.4
L90LL-2		150	60	40.3	53.9
H52LL-1	H52LL-0	300	81.8	59.9	78.6
H90LL-1	H90LL-0	300	81.8	47.5	73.2
H90LL-2		150	91.9	47.5	67.9

* : 文献 2) による試験体

より水平方向荷重を行った。また、左右の軸方向ジャッキにより L 型フレームの平行を保持した。測定関係は水平変形、柱の曲げ変形と軸変形、および鉄筋の歪みを測定した。水平変形は上下の基礎治具間の水平変形とし、変位計を試験体の中心に設置し、測定している。水平変形角はそれを試験区間 540mm で除した値とした。また、軸変形であるが、表面は試験区間の 540mm を左半分と右半分それぞれ 5 箇所分割し (測定区間は 10,105,310,105,10mm となる。), 計 10 箇所測定し左右 5 箇所の総和を軸変形としている。裏面は試験区間内のうちその内部 465mm 区間で左右 1 箇所、計 2 箇所測定した。そして、表裏左右 4 箇所平均をとり、平均軸変形としている。なお、裏面では試験区間より少ない測定間隔で軸変形を測定しているが、この上下端部の未測定領域は損傷していないので、裏面での軸変形も試験区間の軸変形とほぼ同等と考えている。また、曲げ変形は表面で測定した軸変形から算定する。曲げせん断加力の試験体は、一定軸力下で繰り返し水平荷重を行った。水平荷重は、 $\pm 0.5/100\text{rad}$ (各シリーズで軸力の高い試験体のみ)、 $\pm 1/100\text{rad}$ 、 $\pm 1.5/100\text{rad}$ 、 $\pm 2/100\text{rad}$... というように各部材角につき正負それぞれ 2 サイクルずつ行いながら部材角を増加させ、軸力を負担できなくなるまで実験を行った。L90LL-2 は曲げ変形が卓越し、通常の正負漸増荷重では実験終了までの繰り返し荷重数が多くなるため、一方向の水平加力により試験体を破壊させた。

3. 実験結果

3.1 軸圧縮実験結果

図-3(a)(b)にシリーズ L の軸応力度 - 平均軸歪関係を示す。ここで、縦軸は全軸力を全断面積で、横軸は平均軸変形を試験体区間 540mm で除したものととしている。試験体せいの 540mm で除したものである。文献 1) では、式(1)で表される初期摩擦軸力計算値 P_{fro} を基準に、軸応力度 - 平均軸歪関係の下り勾配を 2 本の折れ線でモデル化している。すなわち、最大軸応力度点 (点 A) と応力度が P_{fro} になるときの点 B を結んだ線と P_{fro} の点 (点 C)

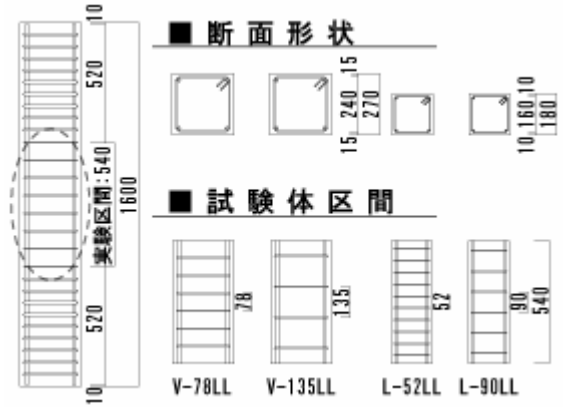


図 - 1 配筋詳細図

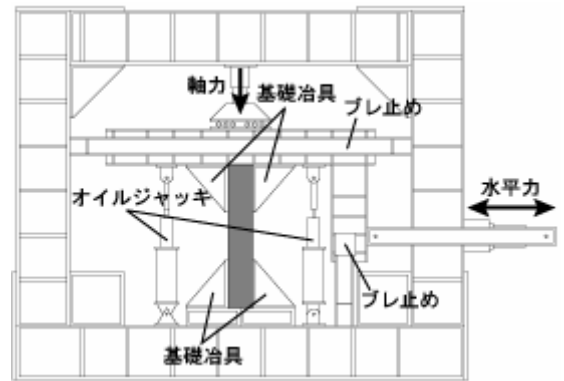


図 - 2 加力装置

と応力度が P_{fro} の半分になるときの点 D を結んだ線である。文献 1) では、この交点 E を滑り開始時摩擦軸力実験値 P_{fr} と呼んで、曲げせん断実験と関連づけている。表-3(a)にこれらの軸圧縮試験体の実験結果の一覧を示す。

$$P_{fro} = b \cdot D \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \frac{\sin\theta \cdot \cos\theta + \mu \cdot \sin^2\theta}{\sin\theta \cdot \cos\theta - \mu \cos^2\theta} + A_s \cdot \sigma_y \quad (1)$$

ここで、式(1)は、RC 柱が角度 θ (これまで行ってきた実験の平均的な値として 60° としている) の滑り面で摩擦力 (摩擦係数 $\mu (=0.77)$ としている) により抵抗しているときの軸力のモデルを表しており bD は断面の幅とせい、 p_w は帯筋比と降伏強度、 A_s は主筋の全断面積と降伏応力度である。

図-3(c)(d)には文献 2) の試験体を含め全試験体 6 体を帯筋比別に比較したものを示す。これらの図には滑り開始摩擦軸力実験値のみ示してある。それぞれの図で V シリーズと H シリーズは相似の試験体であり、L シリーズは H シリーズと柱高さが異なる試験体である。相似試験体同士を比較すると、帯筋比が低い場合 (図(d)) はほぼ同じ挙動となったが、帯筋比が高い場合 (図(c)) は寸法が大きい試験体により脆性的な挙動を示した。コンクリート強度が両シリーズで若干違うこともあるが、この原因については今後の検討が必要である。

一方、同図で L シリーズと H シリーズを比較すると、

柱高さが長いLシリーズの方がHシリーズに比べて同軸力での平均歪度が小さい傾向がある。この理由を検討するために、**図-3(e)(f)**には**図-3(c)(d)**の横軸のみを軸変形に代えたものを示す。それぞれの図でLシリーズとHシリーズがほぼ同じ挙動となることがわかる。すなわち、LシリーズとHシリーズでは破壊領域がほぼ同じで、軸変形の絶対値がほぼ同程度となっていることがわかる。従って、それを柱高さ長さで除して平均軸歪に換算すると差が生じてしまうと解釈できる。

3.2 曲げせん断実験

図-4(a)~(f)に文献 2)の試験体も含め全試験体の曲げせん断試験体の実験結果を示す。ただし、相似試験体は同一の図に示している。いずれも上にせん断応力度 部材角関係を、下に平均軸歪 部材角関係を示してある。ここで、せん断応力度は水平力を断面積で除したものである。Vシリーズおよび試験体L52LL-1,L90LL-1は典型的なせん断破壊を示したが、試験体L90LL-2はせん断破壊を起こしたものの、顕著な曲げひび割れが観察された。

図中の P_{fr} は最初に設定した一定軸力が負担できなくなった点であり曲げせん断加力終了点を示している。この点を軸力負担能力喪失ステップと呼ぶ。この軸力負担能力喪失ステップの変形がそれまでの試験体の最大変形であることもあるが、そうでない場合も多い。そこで、それまでに経験した最大部材角を軸力負担能力喪失までの最大部材角（あるいは略して軸力負担能力喪失部材角）と呼ぶ。**表-3(b)**にこれらの実

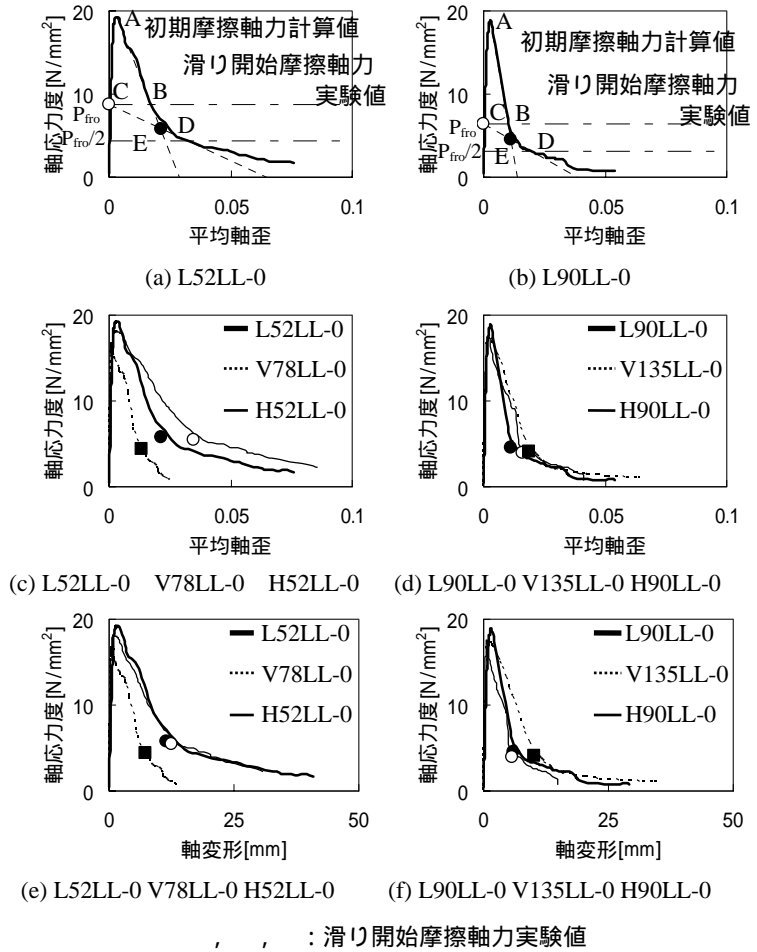


図 - 3 軸応力度 - 平均軸歪，軸応力度 - 軸変形関係
(滑り開始時摩擦軸力実験値 P_{fr} (E点の軸力)の決め方)

表 - 3 実験結果 (a) 軸圧縮実験

試験体名	最大強度時		滑り開始時		初期摩擦軸力計算値 P_{fro} [kN]	$P_{fro} \times \beta_1$	配筋詳細に関する係数 R_d	$P_{fro} \times \beta_1$
	軸強度[kN]	軸変形[mm]	摩擦軸力 P_{fr} [kN]	軸変形[mm]				
V78LL-0	1224	0.61	322	7.32	659	564	0.9	507
V135LL-0	1263	1.43	293	10.1	507	380		390
L52LL-0	625	1.64	189	11.5	281	240		216
L90LL-0	613	1.57	145	6.12	206	155		159
H52LL-0	589	1.03	177	12.6	252	217	0.9	195
H90LL-0	572	0.67	129	5.76	187	140		126

* : 文献 2)による試験体

(b) 曲げせん断実験 $\beta_1 = (1 - 0.5 \frac{S}{D})$ $\beta = (1 - 0.5 \frac{S}{D}) \times R_d$

試験体名	試験体諸元			実験結果						計算値など		対応する軸加力試験体の実験結果	
	対応する軸加力試験体名	作用一定軸力[kN]	最大水平強度[kN]	軸力保持能力喪失ステップの水平力[kN]	軸力保持能力喪失までの最大値			等価軸力 eN [kN]	計算値に合致する摩擦軸力 P_{fr} [kN]	P_{fr} [kN]	$P_{fro} \times \beta_1$ [kN]		
					全変形[mm] (部材角[rad])	せん断変形[mm] (部材角[rad])	軸変形[mm]						
V78LL-1	V78LL-0	675	176.4	10.7	10.7 (0.020)	8.7 (0.016)	4.1	762	540	659	507		
V135LL-1	V135LL-0	675	165.9	5.7	5.9 (0.011)	5.4 (0.010)	2.4	743	290	507	390		
V135LL-2		337.5	152.9	9.1	10.3 (0.019)	7.0 (0.013)	15.9	405	276				
L52LL-1	L52LL-0	300	72.0	-10.2	13.4 (0.025)	9.0 (0.017)	9.0	337	299	281	216		
L90LL-1	L90LL-0	300	74.0	-10.7	10.8 (0.020)	7.8 (0.014)	2.4	328	235	206	159		
L90LL-2		150	62.2	45.9	27.0 (0.050)	9.7 (0.018)	4.2	178	318				
H52LL-1	H52LL-0	300	82.1	16.7	5.4 (0.015)	(-)	(-)	342	183	177	195		
H90LL-1	H90LL-0	300	70.3	52.4	5.1 (0.014)	(-)	(-)	333	169	129	126		
H90LL-2		150	73.9	-17.6	10.8 (0.030)	(-)	(-)	183	196				

験結果を示した。本実験シリーズではせん断破壊後の軸力保持能力喪失部材角を対象にしている。ところが、今回行ったLシリーズはシアパン比が大きいので、一部曲げ変形が無視できない試験体もあることが予想された。そこで、今年度の試験体では前述したように曲げ変形成分を測定している。曲げ変形の算定は表面のみとし、5箇所分割した左右の変位計の伸び量の差を、変位計の測定区間で掛け、左右の変位計の距離で除している。5箇所それぞれの曲げ変形成分を足し合わせ、全体の曲げ変形成分としている。図-5は今年度の曲げせん断加力試験体6体のせん断変形の全変形に対する比を縦軸に、横軸に部材角をとって示したものである。せん断変形は全変形より前述の曲げ変形を減じたものとし、また、図は各加力サイクルの1回目のピークのみ示した。図を見ると特にシアパン比の大きいLシリーズでせん断変形成分の比率が少なくなっていることがわかる。そこで、今年度の6体の試験体については前述の軸力負担能力喪失部材角を求めるときせん断変形のみを対象にしたものも求めた。この値を表-3(b)に併せて示した。また、図-6(a)~(c)にはLシリーズの3体のせん断応力度 - せん断変形のみによる部材角の関係を示しておく。

結果をみると、軸力の大きさをパラメータにしたL90LLシリーズ、V135LLシリーズとも、軸力の高い試験体の

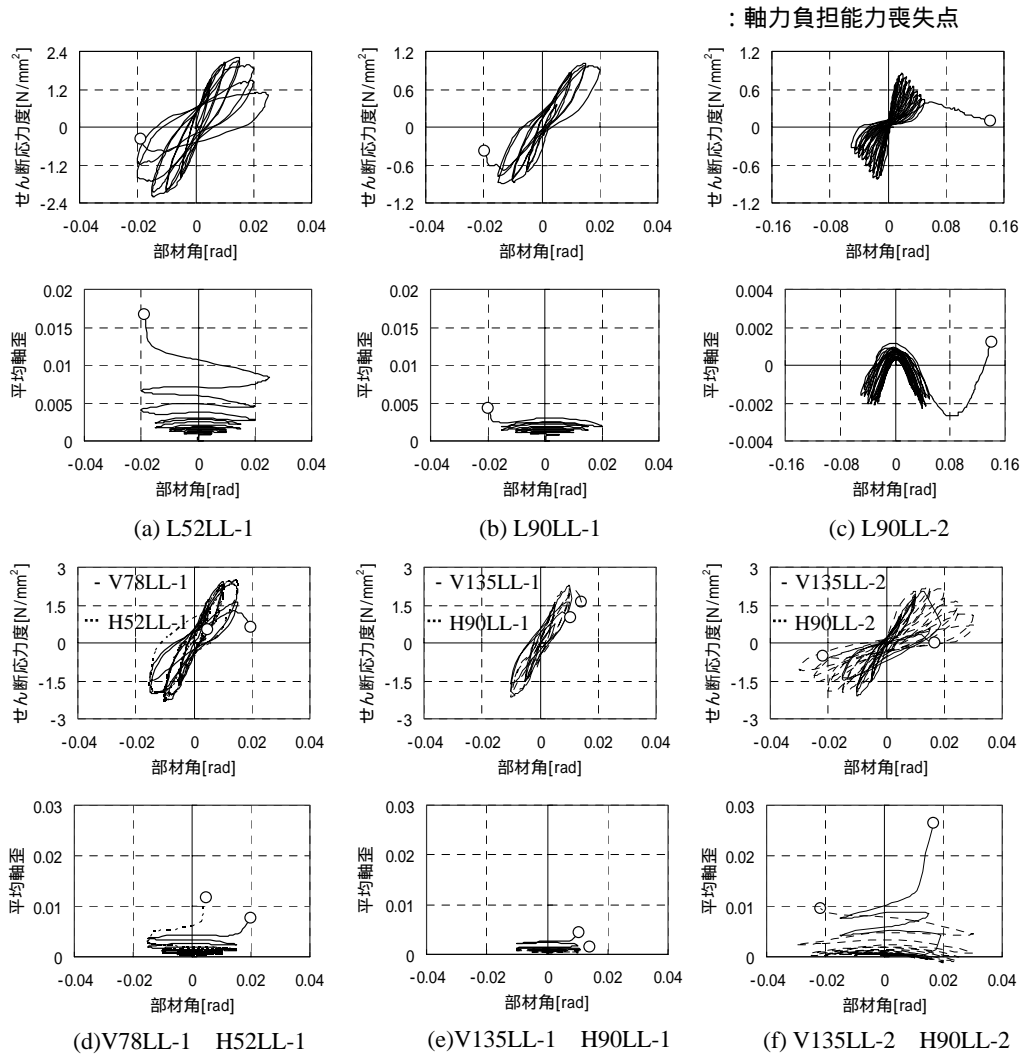


図 - 4 曲げせん断実験結果(全変形)

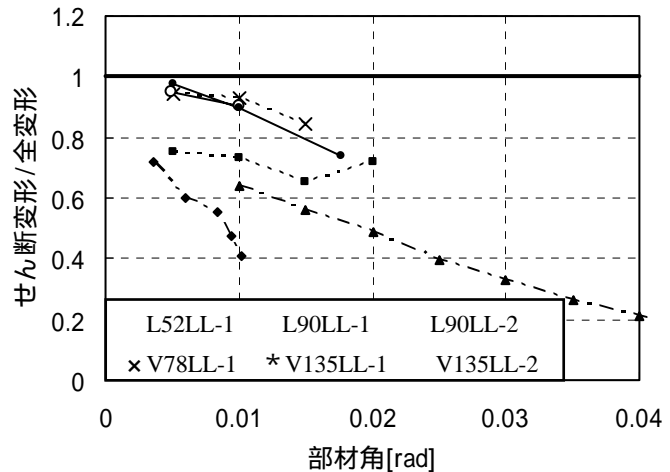


図 - 5 せん断変形/全変形 - 部材角

方が早く軸力負担能力を喪失し、またそのときの軸変形は小さかった。

図-4(d)~(f)で寸法効果の影響についてみると、軸力の高い試験体(V78LL-1, V135LL-1)では比較している試験体(H52LL-1, H90LL-1)とほぼ同じ実験結果が得られ

ているが、軸力の低い試験体(V135LL-2)においては寸法が大きい試験体の軸力負担能力喪失部材角が小さかった。

文献 1)では、高軸力では配筋詳細の影響がなく、低軸力では配筋詳細の影響が大きくなる、と結論づけてい

るが、寸法効果に対しても同じ事が言える可能性もある。ただし、コンクリート強度も異なり今後の検討が必要である。

4. 実験結果の考察

今回の実験結果を文献 1)で提案された手法により寸法効果の影響の観点から検討する。図-7(a)は軸力負担能力喪失部材角実験値(横軸)と 3.1 節で示した対応する軸圧縮試験体の滑り開始時摩擦軸力実験値 P_{fr} に対する等価軸力 eN (説明は後述)の比(縦軸)との関係を示したものであるが、文献 1)では両者に相関があるとしている。図中の実線は文献 1)で示された軸力比に、等価軸力/滑り開始摩擦軸力実験値 P_{fr} をとった場合の近似式 R であり、V シリーズを黒塗りの記号で、L シリーズを演算の記号で示し、V シリーズに対応する試験体(H シリーズ)を白塗りの記号で加筆し、対応が分かるように点線で結び示している。図-7(a-1)は全変形で部材角を取り、図-7(a-2)はせん断変形のみで部材角を取っているが、文献 2)の試験体は曲げ変形成分を測定していなく、実験の中でせん断破壊を顕著に見せていたため、曲げ変形成分はごわずかだと考え、図-7(a-1)と同じ値を示している。

図をみると、図-7(a-1)では曲げ変形を起こした試験体 L90LL-2 が大きく近

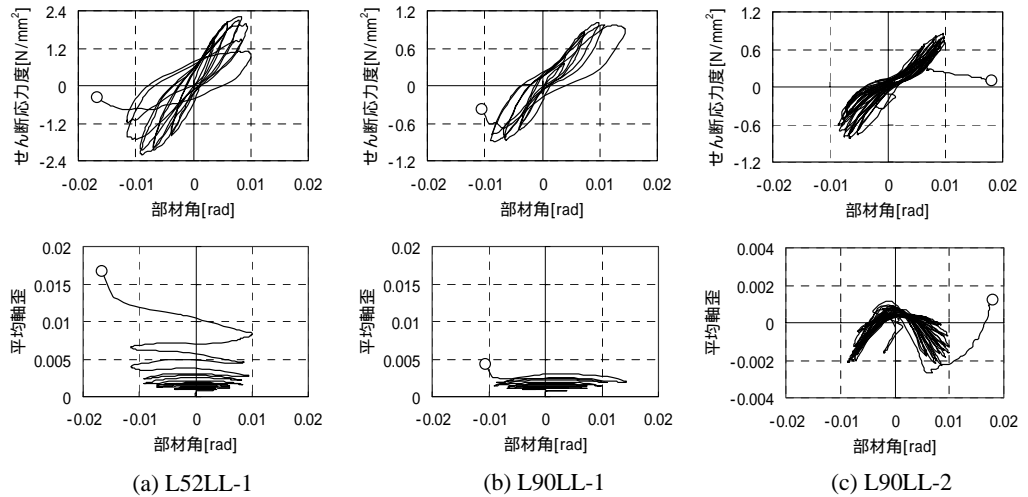
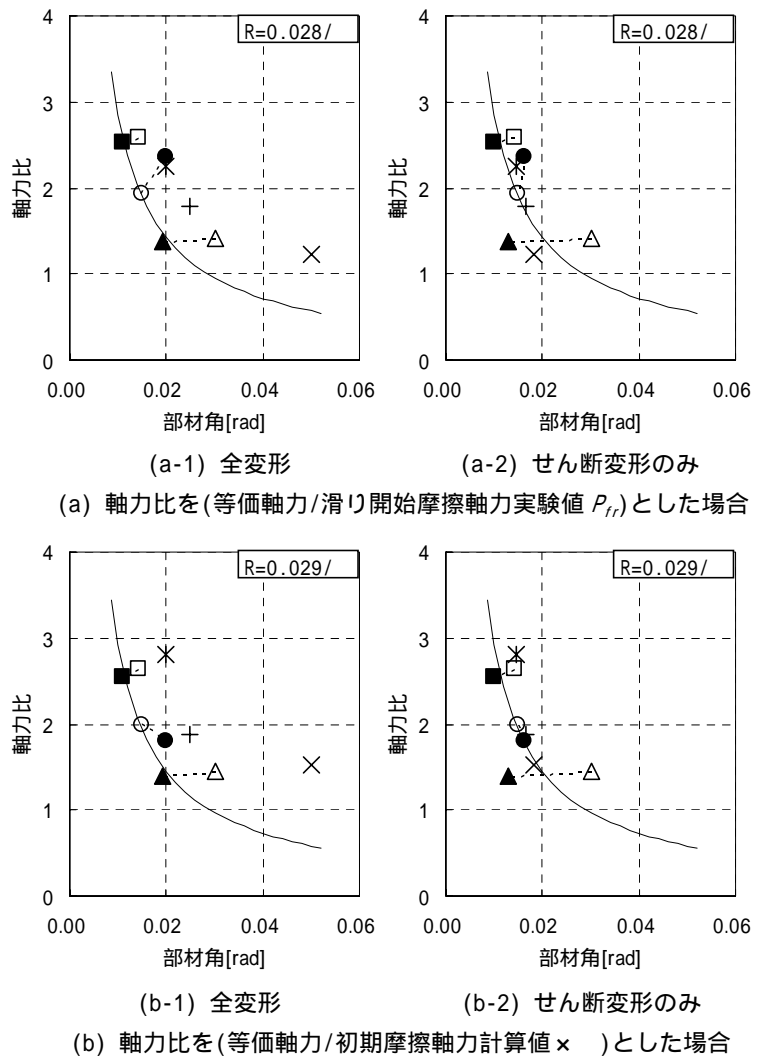


図-6 曲げせん断実験結果(せん断変形)



(a) 軸力比を(等価軸力/滑り開始摩擦軸力実験値 P_{fr})とした場合

(b) 軸力比を(等価軸力/初期摩擦軸力計算値 \times)とした場合

$$\beta = (1 - 0.5 \frac{S}{D}) \times Rd$$

V78LL-1	V135LL-1	V135LL-2
+ L52LL-1	* L90LL-1	x L90LL-2
H52LL-1	H90LL-1	H90LL-2

図-7 等価軸力比(せん断強度使用)と軸力負担能力喪失までの最大部材角の関係

似曲線状からずれていることが分かる。図-7(a-2)では、今回の試験体はやや安全側に評価される試験体もあるが、全体的には文献 1)と同じ傾向があると判断できる。個別の試験体での適合性をみるために、表-3(b)のデータを用い試験体毎にこの近似曲線に合致する P_{fr} を逆算し、表-3(b)の計算値の最後の欄に示した。その右には対応する軸試験体の P_{fr} を表-3(a)から書き写してあるが、両者を比べると、V135LL シリーズの試験体は軸力によって合致する P_{fr} が大きく異なり、今後の検討課題である。

寸法効果の観点から見ると、図-7(a-2)で V135LL シリーズについては、軸力の高い試験体では寸法効果の影響があまり見られず評価式として妥当であったといえるが、軸力の低い試験体では近似曲線の近傍にはあるものの部材角において大きく差ができ、寸法効果の影響が表れた。また、V78LL シリーズでは軸力が高い試験体でも寸法効果の影響が若干表れていることが分かる。これは、軸圧縮実験において負勾配以降の実験結果の違い、滑り開始時摩擦軸力実験値の誤差などからなると考えられる。

滑り開始時摩擦軸力実験値は実験結果なので、文献 1)では、これに代わるものとして、以下の式(2)を提案している。

$$R = \frac{0.029}{\eta} \quad \left(\eta = \frac{eN}{P_{fr,cal}} \right) \quad (2)$$

$$eN = N + Q \frac{\sin^2 \theta - \cos^2 \theta - 2\mu \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{\sin \theta \cdot \cos \theta - \mu \cdot \cos^2 \theta}$$

$$P_{fr,cal} = P_{fro} \cdot \left(1 - 0.5 \cdot \frac{S}{D} \right) \cdot R_d = \beta \cdot P_{fro}$$

この式は等価軸力 eN と式(1)を配筋詳細の影響で補正した $P_{fr,cal}$ による軸力比 R を、喪失部材角 R と関連づけたものである。ここで、等価軸力とは作用せん断力のひび割れ面を滑ろうとする力への寄与を考慮した軸力という意味である。また、 N は作用軸力、 Q は軸力負担能力喪失ステップ時のせん断力であるが、せん断強度としてよい。さらに、 R_d は配筋詳細の有効係数で、溶接帯筋で 1、135°フックは 0.9、90°フック(余長 4d)では 0.8 である。

図-7(b)は軸力負担能力喪失部材角実験値(横軸)と式(2)による軸力比(縦軸)との関係であるが、図中の実線は文献 1)で示された軸力比に、等価軸力/初期摩擦軸力計算値 \times をとった場合の近似式(すなわち式(2))である。図-7(a-1)に比べ図-7(b-1)の方が近似曲線の近傍に集まってはいるが、曲げ変形の影響が多い試験体 L90LL-2 が大きく近似曲線からずれた結果となった。しかし図-7(b-2)では図-7(a-2)に比べ近似曲線の近傍に集まり結果的にはあるが、式(2)は今回の実験データを加えても評価式としては妥当であったといえる。

寸法効果の影響は、図-7(b-2)において V78LL シリーズに関しては軸力比が低くなったため、誤差が少なくなり寸法効果の影響が見られない結果となった。しかし、V135LL シリーズは変化が見られず、寸法効果の影響が表れたままの結果となった。

このことから、今後も寸法効果の観点から曲げせん断実験を行い既往の方法で中心軸圧縮加力実験の結果と軸力負担能力喪失部材角の関係の影響を、検討していく必要があると考えられる。

5. まとめ

- (1) 単純軸圧縮実験において、相似試験体同士を比較すると、帯筋比が低い場合はほぼ同じ挙動となったが、帯筋比が高い場合は寸法が大きい試験体により脆性的な挙動を示した。
- (2) 断面寸法が同じで、長さのみが異なる試験体の単純軸圧縮実験においては、破壊領域がほぼ同じであった。従って、軸変形を柱高さ長さで除して平均軸歪に換算すると差が生じる。
- (3) 曲げせん断加力実験において、相似試験体同士を比較すると、軸力の高い試験体ではほぼ同じ実験結果が得られているのに対し、軸力の低い試験体では寸法が大きい試験体の軸力負担能力喪失部材角が小さかった。
- (4) 上記(1)(3)のまとめについてはコンクリート強度などの性能が両シリーズで若干違うこともあり、この原因については今後の検討が必要である。
- (5) 文献 1)による軸力負担能力喪失部材角評価式(式(2))は今回の寸法の異なる実験データを加えても、評価式としては妥当であった。ただし、曲げ変形成分が多い場合には曲げ変形を除いてせん断変形のみとする必要があった。

参考文献

- 1) 加藤大介, 李柱振, 中村友紀子, 本多良政: 配筋詳細に着目したRC造せん断破壊柱の軸力保持性能に関する実験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第610号, pp153-159, 2006.12
- 2) 宮島雄代, 富田泰宇, 李柱振, 加藤大介: RC造柱のせん断破壊後の軸力負担能力に及ぼす配筋詳細の影響の評価実験, 第29回コンクリート工学年次論文報告集29-3, pp.79-84, 2007
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 4) 日本建築センター: 2001年版建築物の構造関係技術基準解説書